

論文 横方向プレストレスを導入したパイルキャップの耐震性に関する解析的研究

山下 亮*¹・篠原 保二*²

要旨: 近年, 杭頭接合部 (以下, パイルキャップと略す) において, 水平耐力の高い杭が普及してきているため, パイルキャップ内の配筋量が大幅に増加し, 配筋が過密になり施工性が問題になっている。パイルキャップを過大にすることなく, この過密配筋を解消するためにはパイルキャップに横方向プレストレスを導入することが有効であると考えられる。既往の研究として, 杭基礎の一部を模擬した要素実験が行われている。本論ではまず, 既往の実験結果を解析対象とする 3 次元有限要素法解析を行い, 解析モデルの妥当性を検証した。その後パイルキャップに横方向プレストレスを導入し, 耐震性の向上を 3 次元応力状態に基づいて考察した。

キーワード: 既製杭, パイルキャップ, 摩擦係数, インターフェイス, 横方向プレストレス

1. はじめに

近年, 杭の水平耐力の向上は著しく, 杭の曲げ耐力は大幅に向上している。さらに現在, 中高層建物の多くは終局時における杭の安全性に関する検討を行うようになってきている。その結果, 杭の水平耐力に見合ったパイルキャップを設計すると過密配筋に至りやすくなった。この過密配筋を解消するためには, パイルキャップに対して横方向プレストレスを導入し, パイルキャップの耐力を向上させることが有効であると考えられる。

黒正ら¹⁾は杭として外殻鋼管付き高強度コンクリートパイル (以下 SC 杭) を使用し, フーチング内に杭を杭径だけ埋め込み, 長期許容支持力に相当する軸力を導入した繰り返し載荷実験を行い, パイルキャップの破壊性状について詳細に検討している。この実験では, はじめに加力方向直角方向のパイルキャップ底面のひび割れが開くものの, このひび割れでは最大耐力が決定せず, 加力方向 45 度方向の対角線上 (以下加力方向隅角部とする) のひび割れが増大し, 最大耐力に至った。実験結果に基づいて, 配筋方法によるパイルキャップの最大耐力に及ぼす影響について考察している。

筆者ら²⁾はせん断ひび割れを抑制するため横方向プレストレスを RC 柱に導入し, ひび割れ耐力の向上及びせん断耐力の向上を確認している。この論文の中では等価拘束圧及び損傷度という概念を用いて, 横方向プレスト

レスによる内部コンクリートの拘束効果とせん断ひび割れ挙動を評価している。

本研究では, 黒正ら¹⁾の実物大要素実験を解析対象とした 3 次元有限要素解析を行い, 実験結果との整合性を確認する。その後同じ解析モデルを使用し, パイルキャップの最大耐力に大きな影響を与える対角方向のひび割れを制御するために, 二方向に横方向プレストレスを導入し, プレストレスによる最大耐力及びひび割れに対する影響を 3 次元応力状態に基づいて検討する。

2. 解析対象試験体の実験概要

2.1 解析対象とする試験体の概要

解析対象とする試験体は, 表-1 に示す既報の試験体¹⁾ 四角形配筋 (RECB) と円形配筋 (CIRB) とする。パイルキャップ, 杭, 基礎梁の一部を抽出した実物大試験体を用い, 地中の杭に作用するモーメント分布と同様になるよう, せん断スパンを想定し, 片持ち梁形式の載荷実験を行った。試験体の配筋は梁主筋に D22 を用い, 他の部分は D13 を用いた。破壊性状は, 加力方向隅角部のひび割れが開き, 最大耐力に達した。

フーチング内のコンクリート強度は 26.5 N/mm² および 25.4 N/mm² とし, パイルキャップ内の補強筋の配筋は補強効果の差を確認するため四角形と円形配筋とした。フーチング内の鉄筋量はコンクリートとの体積比で, 四

表-1 試験体詳細

No.	杭径(mm)	鋼管厚さ(mm)	埋め込み長さ(mm)	フーチング(mm)	フーチング内鉄筋	配筋	最大耐力(kN)
6	300	8	300	720×720	D13(SD295)	四角配筋	253
7						円形配筋	286

*1 株式会社江間忠ホールディングス 工修 (正会員)

*2 東京工業大学 建築物理研究センター准教授 工博 (正会員)

角形配筋が 1.4%，円形配筋が 1.5%となり，ほぼ同一である。杭の埋め込み長さは杭直径と同じ 300mm とした。パイルキャップは正方形とし，その 1 辺の長さは杭径の 2.4 倍にあたる 720mm である。基礎梁は幅 500mm，高さ 600mm である。杭先端の加力点には加力用鋼製キャップを取り付けた。使用したコンクリートおよび鉄筋の材料特性を表-2 に示す。

2.2 加力方法および測定方法

試験体を天地逆にして固定し，軸力載荷後，水平荷重を変位制御で正負交番繰り返し載荷を行った。加力点の変位をパイルの高さ(900mm) で除した値を部材角 R と定義し，載荷は軸力 357kN (軸力比 0.12) を作用させたのち，水平載荷は荷重制御で 53kN 及び 106kN を 2 回，変位制御で正負交番載荷を $R=1/200$ ， $1/150$ ， $1/100\text{rad}$ を各 3 回， $R=1/50\text{rad}$ を 1 回行い，その後押し切り載荷を行った。

3. 解析概要

3.1 解析モデル概要

解析対象とする試験体 RECB と試験体 CIRB を，3 次元有限要素法を用いて実験結果のシミュレーションを行った。さらに横方向プレストレス導入量を新たな変数として設定し，コンクリートへの拘束効果を検討した。解析には，DIANA ver 9.4.4 を使用した。解析モデルを図-1 に示す。コンクリート，鋼板，加力用鋼製キャップは中間節点を有する 20 節点直方体要素及び 15 節点 5 面体要素を使用した。境界条件は試験体固定用 PC 鋼棒位置をローラー支点，ジャーナルジャッキ位置をローラー支点とした。試験体の対称性から半分のみをモデル化し，面外方向をローラー支持とした。また杭とコンクリートの間（底面は中詰コンクリートの高さとした）に摩擦要素を用いた。SC 杭は実験時に杭の曲率が線形であり，杭が弾性範囲と判断できたため，8mm 厚鋼管と 52mm 厚コンクリート管の曲げ剛性を足し合わせた曲げ剛性が，鋼管とコンクリートを一体とした肉厚 60mm の SR 杭の曲げ剛性と等しくなるように弾性係数 75000N/mm^2 を計算してモデル化した。横方向プレストレス試験体は PC 鋼棒の径を 32mm とし，二方向からプレストレスを同時に導入した。導入プレストレス率（軸力比のようにプレストレス力をコンクリートの受圧側面積 $720\text{mm} \times 300\text{mm}$ 及びコンクリート圧縮強度で除したものは 0.025，0.075，0.15（試験体名 P1-RECB，P3-RECB，P6-RECB）に設定した。パイルキャップ底面側に二方向から横方向プレストレスを導入した場合が最も耐力が向上することが，予備解析により判明したため，パイルキャップ底面側にプレストレスを導入した。さらに直接プレストレスを導入すると局所破壊の恐れがあるため鋼製の耐圧板をモデ

表-2 実験 解析試験体コンクリート・鉄筋の力学特性

パイルキャップのコンクリート	σ_B (N/mm^2)	σ_{ct} (N/mm^2)	$E_c(\times 10^4\text{N/mm}^2)$
四角形(RECB)	26.5	2.08	2.38
円形(CIRB)	25.4	1.94	2.35
杭部分のコンクリート	σ_B (N/mm^2)	σ_{ct} (N/mm^2)	$E_c(\times 10^4\text{N/mm}^2)$
四角形 円形	76.9	5.28	3.49
鉄筋	σ_y (N/mm^2)	σ_{st} (N/mm^2)	$E_s(\times 10^5\text{N/mm}^2)$
D13(SD295)	354	511	1.81

σ_B : 圧縮強度， σ_{ct} : コンクリート引張強度， E_c : ヤング係数
 σ_y : 降伏強度， σ_{st} : 鉄筋引張強度， E_s : ヤング係数

表-3 プレストレス解析試験体一覧

試験体名	$P/\sigma_B bD$	PC 鋼棒	プレストレス位置
P6-RECB	0.15	32 mm	底面のみ
P3-RECB	0.075	32 mm	底面のみ
P1-RECB	0.025	32 mm	底面のみ

$b=720\text{mm}$ ， $D=300\text{mm}$ （プレストレスを導入する面の側面積）

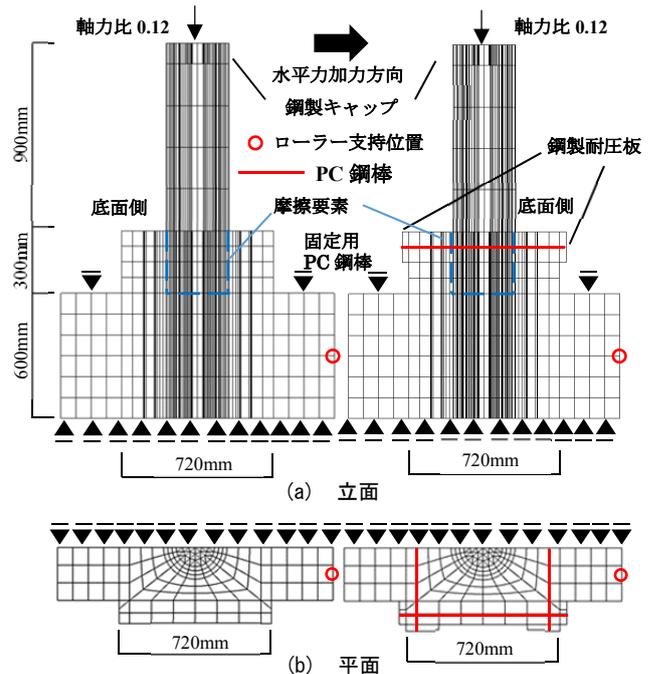


図-1 解析モデル(左試験体 RECB 右試験体 P1, P3, P6-RECB)

ル化した。PC 鋼棒に関しては，アンボンドとした。

3.2 構成則

解析で使用した構成則を図-2 に示す。コンクリートの圧縮上昇域は Popovics³⁾モデルを用い，圧縮強度後は圧縮強度の 1/5 の時のひずみが圧縮強度時ひずみの 5 倍となるような線形軟化を仮定した。圧縮破壊基準には Drucker-Prager の基準を用い，内部摩擦角を 20° とした。最大主応力がコンクリートの引張強度に達するとひび割れが発生し，軟化域は，破壊エネルギーを $0.1(\text{N/mm})$ と

する線形軟化を仮定した。ひび割れ後のせん断剛性は伝達係数 β をひび割れひずみ ϵ_{cr} の関数(式は図-2を参照)で表現したモデルを使用した。また杭とフーチングの間のインターフェイス要素は、引張力を負担しない、摩擦モデルを使用し、摩擦係数は鋼構造設計規準⁴⁾を参考に0.4とした。インターフェイスのせん断剛性に関しては林⁵⁾のひび割れを想定した部材実験より定めた付着応力-滑り関係の2次剛性を参考に3.0(N/mm²/mm)とした。鉄筋の応力-ひずみ関係は、ひずみ硬化を考慮したバイリニア型で表現し、降伏後の剛性は、初期剛性の1/100とした。降伏条件はVon Misesの条件を使用した。鉄筋の付着-すべり関係は、完全付着とした。

4. 試験体 RECB, CIRB 解析結果

4.1 杭荷重-変形角関係

図-3に水平荷重-変形角関係を、表-4に最大耐力とそのときの変形角を示す。変形角は加力点の水平変位を杭の長さ900mmで割ったものとした。試験体 RECB と CIRB の解析結果は実験と同様に試験体加力方向隅角(以下B-B 図-5参照)部のひび割れが大きくなり、耐力低下に至った。最大耐力は実験結果とほぼ一致している。剛性に関しても実験結果とほぼ一致している。剛性が水平荷重200kNまで過小評価しているのは杭とパイルキャップの間の粘着力を解析では考慮していないことがひとつの原因だと思われる。最初の鉄筋の降伏に関しては、試験体 RECB において変形角1.02%、水平荷重168kN時に杭近傍の加力前面の縦筋に見られ、試験体 CIRB において変形角0.76%杭荷重155kN時にB-B方向のひび割れに直行する円形配筋部分(横筋)に見られた。

4.2 鉄筋のひずみ分布

図-4に試験体 RECB 及び CIRB の変形角2%時の鉄筋(横筋)のひずみ分布を示す。解析結果はひずみゲージ近傍のガウス積分点の値である。鉄筋の降伏ひずみは1960 μ である。解析では加力方向前面部の底面側鉄筋が

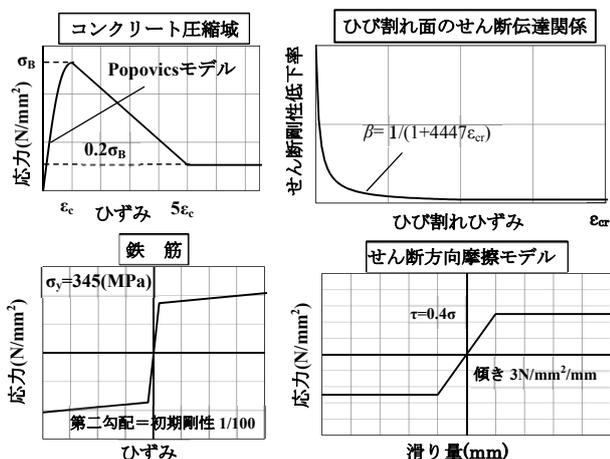


図-2 構成則

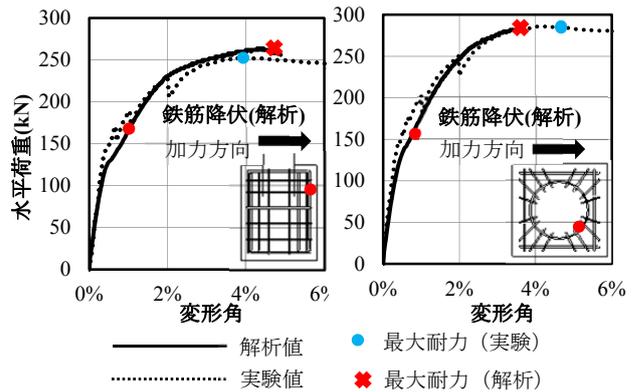


図-3 水平荷重-変形角関係(左試験体 RECB 右試験体 CIRB)

表-4 実験・解析結果

	実験		解析	
	最大耐力 (kN)	変形角 (%)	最大耐力 (kN)	変形角 (%)
RECB	253	3.77	264	4.44
CIRB	286	4.16	282	3.42

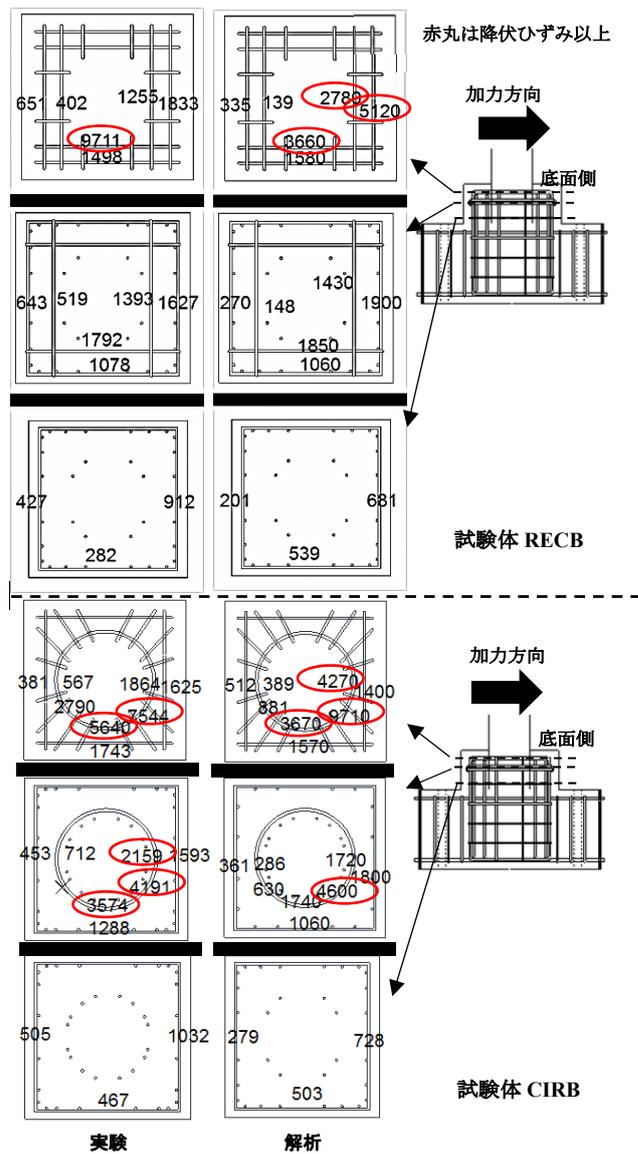


図-4 R=2%時試験体 RECB ひずみ分布(左実験値) (右解析値)

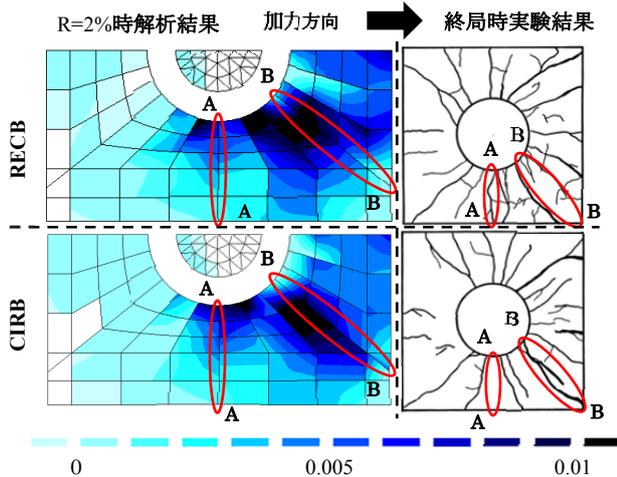


図-5 ひび割れ図(上 RECB 下 CIRB 左 解析 右 実験)

降伏しているが実験では降伏していない。しかし外側の鉄筋のひずみが大きく内側の鉄筋のひずみが小さいなど傾向は捉えている。最も杭に近い加力垂直方向(以下 A-A 図-5 参照)に直交する横筋が降伏している等の傾向も表現できている。

4.3 ひび割れ性状

図-5 に解析による変形角 2%時のひび割れひずみコンター図と実験での最終ひび割れ状況を比較して示す。両試験体とも実験時には、初めに A-A 部分のひび割れが発生し、その後、B-B 部分のひび割れが拡大して、最大耐力が決定された。解析試験体においても B-B 部分のひび割れが最も顕著になり最大耐力に至っていることから実験結果との整合性は良いといえる。解析時に加力方向負方向のひび割れが広がっていないのは杭とパイルキャップ間のインターフェイス(摩擦モデル)に引張力を負担させず、圧縮応力および摩擦によるせん断力のみ負担するモデルとしたためであり、実験結果との整合性においても摩擦モデルが必要であった。

4.4 最小主応力分布図

図-6 に試験体 RECB の最小主応力分布図を示す。加力方向前面部が杭により押され、圧縮応力が作用するが、図-5 のひび割れ図同様に B-B 部に最も大きな圧縮ストラットが形成されている様子がわかる。これは配筋や試験体形状により加力方向の圧縮剛性が試験体加力方向隅角部に比べ相対的に低いため、圧縮力が圧縮剛性の大きい、B-B 部に作用したと考えられる。本図よりパイルキャップ底面側の対角方向 B-B 部の圧縮力から、基礎梁の拘束がある C-C 部へ圧縮ストラットが形成されている様子が伺える。加力方向反対方向のフーチング上面に近い側(D-D 部)に圧縮応力が発生していることが分かる。これは杭がパイルキャップをこじっていくようなてこ反力により発生している。以上により杭からのパイルキャップの力の伝達は主に加力前面部のパイルキャップ底面

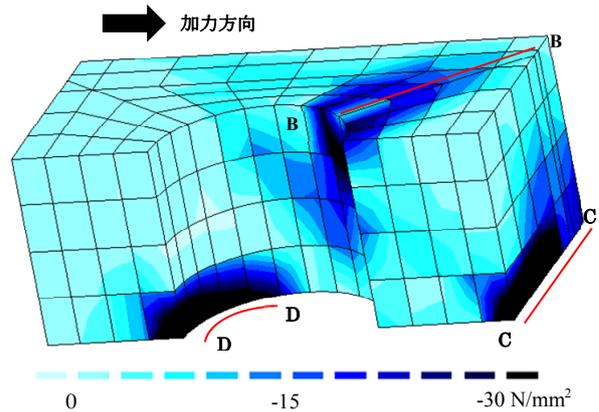


図-6 R=2%時パイルキャップ部の最小主応力図

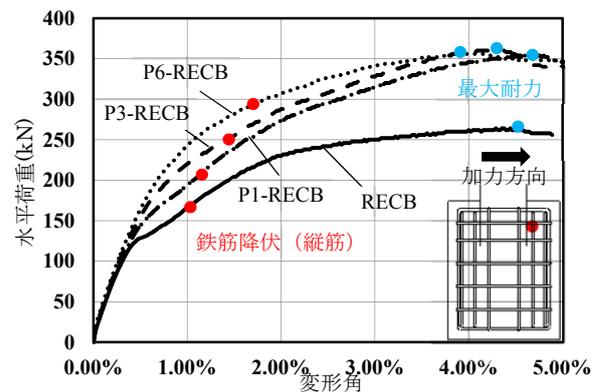


図-7 水平荷重—変形角関係

側への圧縮力と加力反対方向のパイルキャップ上面側の圧縮力およびそれらに伴う摩擦力で構成されている。

5. プレストレス導入試験体の解析結果

5.1 水平荷重—変形角関係

図-7 に試験体 RECB とパイルキャップ底面側二方向に横方向プレストレスを導入した試験体 P1-RECB(プレストレス導入率 0.025)、試験体 P3-RECB(同 0.075)、および試験体 P6-RECB(同 0.15)の水平荷重—変形角関係を示す。施工時を考慮し、横方向プレストレスを導入後に軸力を載荷した。材料の構成則に関しては RECB の解析に使用したものと同一とし、PC 鋼棒を弾性体とした。プレストレス導入率の小さい P1-RECB 試験体および P3-RECB 試験体は図-6 の B-B 部のひび割れの影響を受け、図-7 で示す加力方向の縦筋が、一方、P6-RECB 試験体は図-8 で示す加力方向反対方向の縦筋が初めに降伏した。図-7 によるとプレストレス力が多くなると、剛性も高くなるが部材角 2%前後からプレストレス量の差はなくなり、最大耐力はほぼ同じになる。これは図-8 に示す、加力方向反対側の主筋(縦筋)のひずみの挙動に起因すると思われる。図-8 によると試験体 RECB は変形角 5%まで加力方向反対方向の縦筋が降伏していないが、プレストレスを導入した試験体は水平荷重の増加によって部材角 2%前後で降伏している。これによりパイルキャップの曲

げ変形が卓越し、プレストレス導入率によって最大耐力が変わらなかったと考えられる。

5.2 ひび割れ性状

図-9 に試験体 P1-RECB 及び試験体 P6-RECB の変形角 2.0% 時のひび割れ性状を示す。両試験体とも B-B 部に向かってのひび割れが最も大きくなるが RECB 試験体 (図-5) と比較するとひび割れを抑制している事がわかる。プレストレス方向と直交する A-A 部のひび割れはプレストレスによる抑制の効果が大きい。B-B 部のひび割れ性状も二方向にプレストレスを導入した事により、プレストレス量に応じてひび割れが抑えられていることが分かる。ひび割れ耐力 (ひび割れひずみが 0.5% 以上になった時の水平荷重と定義) は試験体 RECB P1-RECB P3-RECB P6-RECB の順に 130kN, 164kN, 202kN, 238kN となりプレストレスを導入するほどひび割れ耐力が上昇した。最大ひび割れひずみもプレストレスを多く導入した方が小さくなっている。

5.3 損傷度

コンクリートの圧縮領域における損傷度は、図-10 に示す応力の不変量 ξ - r 平面上における偏差応力成分 r を用いて定義する³⁾。すなわち、応力の不変量 (ξ_p, r_p) を有する応力点 P の損傷度 D_f は、静水圧成分 ξ_p における Drucker-Prager 基準の子午線上の偏差応力成分 r_β に対する r_p の比として、 $D_f = r_p / r_\beta$ で定義する。図中の子午線は内部摩擦角 20° の時のものを示す。したがって、どの方向にも引張応力とせん断応力が現れない静水圧軸 (ξ 軸) 上で 0、破壊曲面上で 1 となるが、図-2 に示した最大耐力後の軟化挙動により、破壊局面が縮小していく過程では、損傷度も減少に転じる。図-11 に水平荷重 150kN 時のプレストレスを導入した試験体の PC 鋼棒に一番近い積分点から計算した損傷度を示す。パイルキャップの軸方向応力が低いため、P6-RECB 試験体は、PC 鋼棒耐圧板位置での損傷が大きくなっている。試験体 P1-RECB は B-B 部の損傷が抑えられている様子が分かる。

5.4 等価拘束圧

横方向プレストレスによるコアコンクリートの拘束効果の尺度として、水野ら⁹⁾による等価拘束圧の概念を用いる。等価拘束圧とは、ランダムな応力経路上の一般応力状態を側圧一定の三軸圧縮実験経路上の応力状態に換算した場合の側圧と定義する。3 主応力がほぼ等しい状態で増加すると、等価拘束圧も増大するが、静水圧成分 ξ が同じであっても 3 主応力の差が大きくなると、すなわち偏差応力成分 r が増加すると等価拘束圧は減少する。水平力 150kN を導入した時点でのプレストレス位置に近い積分点の等価拘束圧を図-12 に示す。試験体 P6-RECB をみるとプレストレスの効果が B-B 部および A-A 部に高い拘束効果が見られ、ひび割れに対し効果的に作用する

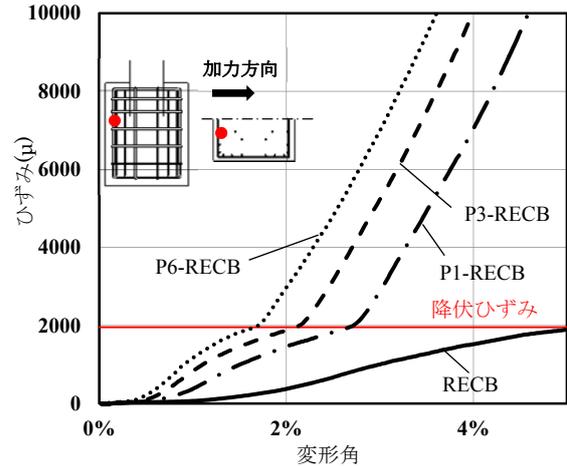


図-8 加力方向反対側の鉄筋 (縦筋) ひずみ

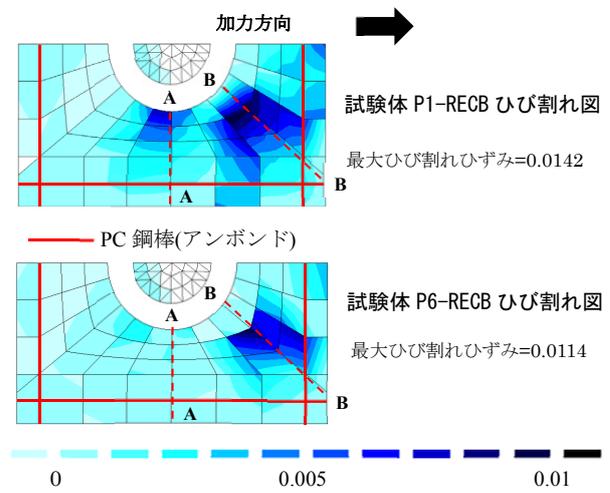


図-9 パイルキャップ底面のひび割れ性状 (変形角 2.0%)

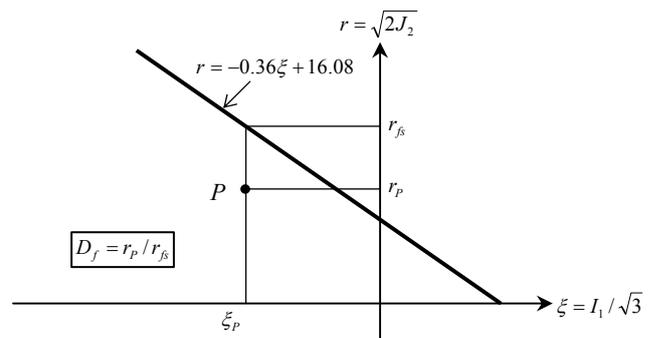


図-10 損傷度について

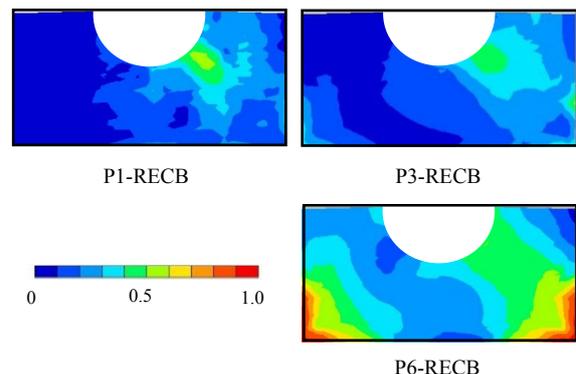


図-11 水平力 150kN 時の横方向プレストレス導入面の損傷度

ことがわかった。試験体 RECB および P1-RECB は杭近傍の部分に高い拘束圧が見られ、これは杭がパイルキャップを押し込む事によって摩擦による圧縮応力が上昇したためと思われる。

5.5 PC 鋼棒の応力

PC 鋼棒が試験体の広がっていく力(コンクリートのひび割れ)を抑えるため PC 鋼棒の応力はプレストレス導入時より増大していく。図-13 に PC 鋼棒の応力-部材角関係を示す。PC 鋼棒の応力上昇は、加力方向側に配した PC 鋼棒が最も大きく、ひび割れの抑制に寄与している。特に、プレストレス導入量の少ない P1-RECB 試験体の応力上昇が大きく、プレストレス導入量の大きい試験体と同程度まで上昇している。この応力上昇は最大耐力がプレストレス量によってあまり変わらない要因の一つとも考えられるが、応力上昇はひずみ増分でもあり、ひび割れ幅の抑制には、ある程度のプレストレス導入量が必

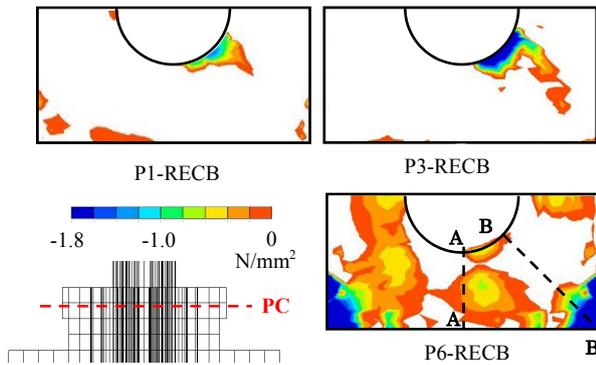


図-12 水平力 150kN 時の横方向プレストレス導入面の等価拘束圧

加力方向反対側の PC 鋼棒 加力方向前面側の PC 鋼棒

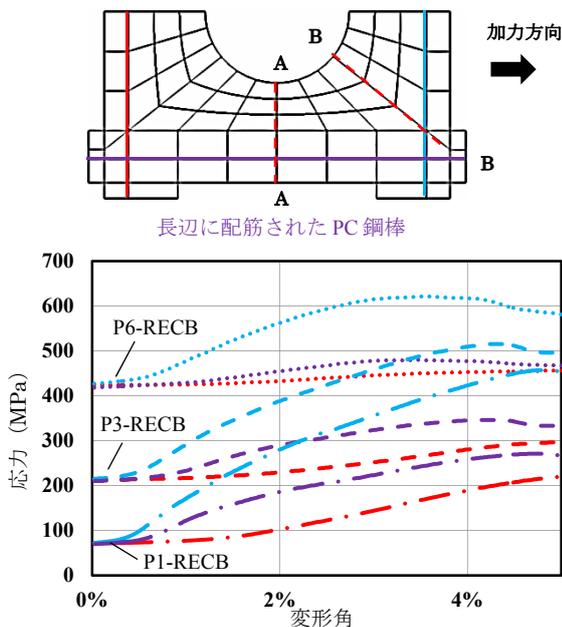


図-13 PC 鋼棒の応力-部材角関係

要である。本解析では、弾性体を仮定し、太径の PC 鋼棒を使用したが、PC 鋼棒の径が大きくなるほどひび割れの拡大に対する剛性が高くなるため、PC 鋼棒の径については今後検討する必要がある。

6. まとめ

横方向プレストレスを導入したパイルキャップにおける数値解析から、以下の知見を得た。

- (1) 杭とパイルキャップ間に摩擦要素を用い、コンクリートと鋼の摩擦係数として、一般に用いられている摩擦係数 0.4 とすることによって実験結果を再現出来た。
- (2) 横方向プレストレスを加える事によってパイルキャップのひびわれ耐力およびせん断耐力を向上させる事ができる事がわかった。
- (3) 各積分点レベルにおける三軸応力状態に基づく等価拘束圧という概念を用いて、横方向プレストレスによる内部コンクリートの拘束効果を評価した。
- (4) 本解析ではパイルキャップの水平方向のみにプレストレスを導入し、鉛直方向は導入していないため、杭の支圧による摩擦力が作用する部分に大きな等価拘束圧が作用した。さらに耐震性を向上させるためには、パイルキャップの引張鉄筋の降伏も考慮すると、鉛直方向にプレストレスを導入するのが効果的だと考えられる。

参考文献

- 1) 黒正清治, 和田章, 小林克己, 臼井賢, 林静雄: 水平力を受ける杭と基礎の結合部に関する研究(その1, その4), 日本建築学会北陸支部 学術講演梗概集, 1983.09
- 2) 篠原保二, 宮野覚也, 渡部洋, 林静雄: 横方向プレストレス RC 柱の能動的拘束効果と破壊メカニズムに関する解析的研究, 日本建築学会構造系論文報告集, No.558, pp.115-121, 2004.4
- 3) S.Popovics: A Numerical Approach to the Complete Stress - Strain Curve of Concrete, Cement and Concrete Research, Vol.3, pp.583-599, 1973
- 4) 日本建築学会: 鋼構造設計規準 1999
- 5) 林静雄: 鉄筋コンクリート部材における異形鉄筋とコンクリートとの付着に関する実験研究, 東京工業大学学位論文, 1984
- 6) 水野英二, 畑中重光: コンクリートのひずみ軟化型構成モデルの開発とコンファインドコンクリートの三次元有限要素解析, 土木学会論文集, No.571, V-36, pp.185~197, 1997.8
- 7) TNO DIANA: DIANA User's Manual Release 9.4.4